

深奥理论 通俗阅读

吴今培◎著

量子

神奇的量子世界之旅

概论

清华大学出版社

量子科学 20 世纪伟大发现

深奥理论 通俗阅读

量子概论

——神奇的量子世界之旅

吴今培 著

清华大学出版社

北 京



量子理论是研究微观世界规律的一门科学理论。那么，微观世界究竟有多么微小呢？它指的是一厘米的一千万分之一大小的世界。我们日常生活着的世界是一个看得见的、感受得到的、按部就班的宏观世界。倘若我们能缩小十个数量级，便打开了通向微观世界的大门，进入神奇的量子世界。那是一个错综复杂、乱花迷眼、迷雾重重的世界，它和宏观世界的规律完全不同，具有超出我们常识的极其奇妙的特性。

掐指算来，量子概念的诞生已经超过一个世纪，但其含义非常深奥，和人们的日常生活格格不入，甚至违背我们的生活常理，她就像一个神秘的少女，我们天天与她相见，却始终无法猜透她的内心世界。然而，量子理论却能解释量子世界一切不可思议的现象，正是在它的指引下，今日的科技才如此朝气蓬勃，并给人类社会带来了伟大的技术革命。从半导体到核能，从计算机到激光，从集成电路到生物技术，无不留下量子的足迹。可以说，量子理论把它的光辉播撒到人类社会的



每一个角落,成为有史以来在实用中最成功的科学理论。

21 世纪信息科学将从“经典”时代跨越到“量子”时代,其发展将对国民经济、社会发展、国防安全等产生直接而重大的影响。量子技术已成为世界各国抢占的战略制高点,我国量子科学领军人物潘建伟院士认为,量子技术可能像 20 世纪“曼哈顿计划”造出原子弹那样改变世界格局。中国量子科学实验卫星“墨子号”于 2016 年 8 月发射升空,并圆满实现了各项科学实验目标,标志着我国量子科技水平雄居世界前列,这对攀登世界科技创新之巅具有重大意义。

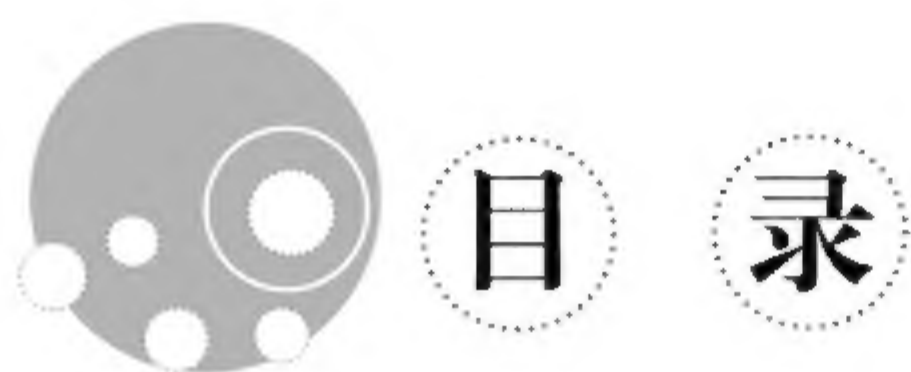
由于量子理论内容艰涩,人们几乎都是只闻其名,不知其详。如果你觉得量子理论难以理解的话,这是很自然的,因为你生活在经典世界中,你所看到的都是宏观物体和它们的连续运动,从一开始你所受的物理教育也都是牛顿的经典理论。然而,这一切对于量子世界中的微观粒子及其运动都已不再适用。为了让读者顺利步入一个完全陌生的量子世界,《量子概论》这本科普小册子,试图将深奥的知识通俗化、条理化,深入浅出地描绘量子的诸多不可思议的表现及其最新应用,以便更多人轻松快速阅读,把握量子理论的要旨,从而激发公众对于量子科技的浓厚兴趣和广泛关注。当然,对于专业读者,还是希望大家满怀勇气与敬意去研读经典著作,领略其原汁原味的内涵与韵味。

本书以量子理论地发现、发展为主线,循序渐进地讲述了人类探索量子世界的全过程。内容涵盖了波粒二象性、量子化原子模型、物质波、波动力学、矩阵力学、测不准原理、量子叠加、量子纠缠、量子信息、量子计算和量子通信等。通过这样一次量子世界之旅,量子运动将真实地呈现在读者面前,它是非连续的、不确定的,完全不同于我们所熟悉的宏观连续运动。原来,我们眼中的世界并不是世界的全部。既然我们有幸来到这个世界,就应该尽量了解这个世界的全部,欣赏这个世界的奇妙。我们的目标正是让更多的人了解量子、理解量子、应用量子,用这个时代最流行的一个词来表述的话,就是让量子酷起来!

作者在撰写本书的过程中,参考、引用、融合了国外相关的文献著作及研究成果,在此对书中涉及的专家、学者表示衷心的感谢。同时,作者还要感谢本书的责任编辑,是她做出的贡献,才让本书得以顺利出版。

客观地说,受限于作者的能力与水平,书中的缺点和不妥之处肯定不少,真诚地期望读者批评指正。

吴今培
2019年3月



1 量子诞生	3
2 光量子假说	11
3 玻尔的原子模型	19
4 矩阵力学	24
5 波动力学	30
6 测不准原理	39
7 量子纠缠	44
8 量子论发展史回顾	68
9 20 世纪的一场科学争论	81
10 量子论的其他解释	87
11 量子信息	99
12 量子计算	107
13 量子通信	121
14 量子人工智能	134
尾声	145
参考文献	149
中英文人名对照表	151

20 世纪初,在物理学阳光灿烂的天空中飘浮着两朵乌云:一朵是**以太**问题;另一朵是**黑体辐射**问题,它们成为经典物理学研究中遇到的难题。正是这两朵不起眼的乌云,给世界带来一场前所未有的狂风暴雨,驱散这两朵乌云,将会导致物理学的伟大新生。

第一朵乌云,最终导致了相对论革命的爆发。

第二朵乌云,最终导致了量子论革命的爆发。这是本书论述的主题,让我们从这里出发吧!

量子诞生

大家知道，一个物体之所以看上去是白色的，那是因为它反射了所有频率的光波；反之，如果看上去是黑色的，那是因为它吸收了所有频率的光波。物理上为了研究热辐射问题，提出了一种理想的模型，这样的模型叫作“黑体”，指的是那些可以吸收全部外来辐射的物体。绝对的黑体在自然界虽然不存在，但对“黑体”的研究是解决一切物体辐射的关键。

19 世纪末，人们开始对黑体模型的热辐射问题开展研究。其实，很早的时候，人们就已经注意到对于不同的物体，温度和辐射频率似乎有一定的对应关联。比如说金属，有过生活经验的人都知道，要是我们把一块铁放在火上加热，那么到了一定温度的时候，它会变得暗红起来，温度再高些，它会变得橙黄，到了极高温度的时候，如果能想办法不让它汽化，我们可以看到铁块将呈现蓝白色。也就是说，加热物体的温度（或能量）与其释放的光的颜色之间有一定关系，而颜色又

同光的频率(或波长)有关。

问题是,物体的辐射能量和频率究竟有着怎样的函数关系呢?

经过科学家的研究,在黑体问题上,我们得到了两套公式。可惜,一套只对长波有效,而另一套只对短波有效。这让人们非常郁闷,就像有两套衣服,其中一套上衣十分得体,但裤腿太长;另一套的裤子倒是合适,但上衣却小得无法穿上身。最要命的是,这两套衣服根本没办法合在一起穿,因为两个公式推导的出发点是截然不同的!从经典的麦克斯韦电磁波理论去推导,就得到适用于长波的瑞利-金斯公式;而从玻尔兹曼运动粒子的角度出发去推导,就得到适用于短波的维恩公式。总之,用他们的公式来解释黑体辐射,无论如何也不能使辐射能量和辐射光谱统一起来。

正当人们在黑体辐射的研究中遇到困境,并不知道这个问题最后将会得到一个怎样的解答的时候,一个德国人——马克斯·普朗克登上了舞台,物理学全新的一幕终于拉开了。命中注定,这个名字将要光照整个 20 世纪物理学史。

普朗克于 1858 年 4 月 23 日生于德国基尔的一个书香门第。他少年时



图 1 普朗克

代极喜欢音乐,以至于中学毕业后选择专业时,在音乐和自然科学间犹豫再三,即使到了大学他还在留恋音乐,并且亲自领导了一支乐队,又是学院合唱团的指挥。在他通向未来的大路上又遇到一次干扰,老师坚决反对他攻读理论物理。1924年普朗克在讲演中回忆说,当我开始研究时,我可敬的老师约里对我描绘物理是一门高度发展的、几乎是尽善尽美的科学。现在,能量守恒定律的发现给物理学戴上桂冠之后,这门科学作为一个完整的体系,已经建立起足够牢固,并接近于最终稳定的形式。

幸亏中学和大学的这两次干扰都没有动摇普朗克最终的决心。他21岁时通过了博士学位论文,获得慕尼黑大学的博士学位。他关于热力学方面的研究孕育了其后来的新思想。1886年,普朗克读到了维恩关于黑体辐射的论文,并对此表现出了极大的兴趣,决定彻底解决黑体辐射这个困扰人们多时的问题。最初,普朗克利用数学上的内插法,通过在黑体辐射的维恩公式与瑞利-金斯公式之间寻求统一,得到了黑体辐射公式。普朗克得到的黑体辐射公式能够解释黑体辐射的实验结果。但是,他不知道这个公式背后的物理意义,并没有认识到它将引起物理学根基的巨大变化。

为了解释他的新公式,后来普朗克回忆道:“即使这个新的辐射公式证明是绝对精确的,如果仅仅是一个侥幸揣测出



来的内插公式,它的价值也只能是有限的。因此,……我就致力于找出这个公式的真正物理意义。这个问题促使我直接去考虑熵和概率之间的关系,也就是说,把我引到了玻尔兹曼的思想。”原来普朗克发现,仅仅引入内插法是不够的,如果要使他的新公式成立,他必须接受他一直不喜欢的统计力学,从玻尔兹曼的角度来看问题,把熵和概率引入系统中来。而在处理熵和概率的关系时,就必须做一个假定,假设能量在发射和吸收的时候,不是连续不断,而是分成一份一份的。

1900年10月19日,柏林物理学会举行讨论会。会上,普朗克提出了一个自己推出的公式。这个公式无论对长波、短波、高温、低温都惊人地适用,维恩公式和瑞利-金斯公式被和谐地统一到一起。于是满座大惊,虽然还没有一个人能完全弄清楚这个新公式,但是在事实面前却无人提出反对意见。两个月之后,1900年12月14日,人们正在忙着准备欢度圣诞节。这一天,普朗克在德国物理学会上发表了他的大胆假设。他宣读了那篇只有3页的名留青史的论文《黑体光谱中的能量分布》,其中改变历史的是这段话:

为了找出 n 个振子具有总能量 U_n 的可能性,我们必须假设 U_n 是不可连续分割的,它只能是一些相同部件的有限总和……

请读者记住,1900年12月14日这个日子,就是量子的诞辰。那一年普朗克42岁。今日,他终于痛快淋漓地说:“一言以蔽之,我做的这件事,可以简单地看作是孤注一掷。我生性平和,不愿进行任何吉凶未卜的冒险。但是我经过6年的艰苦摸索,终于明白,经典物理对这个黑体辐射问题是丝毫没有办法的。旧的理论既然无能为力,那么就一定要寻找一个新的解释,不管代价多高也一定要把它找到。除了热力学的两条定律必须维持之外,至于别的,我准备牺牲我以前对物理所抱的任何一个信念。问题往往是这样,到实在不能解决时,抛弃旧框子,引入新概念,就立即迎刃而解了。”

普朗克引入了一个什么新概念呢?就是辐射的能量不是连续的,而是一份一份的,像机关枪里不断射出的子弹。这一份一份的能量普朗克把它称作“能量子”。但随后,在另一篇论文里,他就改称为“量子”,英语就是 quantum。量子就是能量最小单位,就是能量里的一美分,一切能量的传输,都只能以这个量为基本单位来进行。它可以传输一个量子,两个量子,任意整数个量子,但却不能传输 $1/2$ 量子、 $1/4$ 量子。那样的状态是不允许的,就像你不能用现钱支付 $1/2$ 美分一样。在两个基本单位之间,是能量的禁区,我们永远也不会发现能量的计量会出现小数点以后的数字。



那么,这个最小单位究竟是多少呢?从普朗克的辐射方程可以容易地推算出答案:它等于一个常数乘以特定辐射的频率。用一个简明的公式来表示:

$$E = h\nu$$

其中 E 是单位量子的能量, ν 是频率, h 是一个神秘的量子常数,以它的发现者去命名为“普朗克常数”。它等于 6.626×10^{-27} 尔格·秒,也就是 6.626×10^{-34} 焦耳·秒。 h 这个值,后来竟是构成我们整个宇宙最为重要的三个基本物理常数之一,另外两个是引力常数 G 和光速 c 。 G 出现在牛顿万有引力公式 $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ 中, c 出现在爱因斯坦质能等价公式 $E = mc^2$ 中。正是这三个常数把宏观宇宙、微观世界与光速时空联系起来。

利用这个简明公式,我们可以做一些基本计算。比如对于频率为 10^{15} 赫兹的辐射,对应的量子能量是多少呢?那么就简单地把 10^{15} 乘以 $h = 6.6 \times 10^{-34}$,算出结果等于 6.6×10^{-19} 焦耳,也就是说,对于频率为 10^{15} 赫兹的辐射,最小的“量子”是 6.6×10^{-19} 焦耳,能量必须以此为基本单位来发送。当然,这个值非常小,也就是说量子非常精细,难以察觉。因此由它们组成的能量自然也十分细密,以至于我们通常看起来,能量的传输就好像是平滑连续的一样。

普朗克提出能量必须是有限个可能态,它不能是无限连续的,这有什么了不起的意义呢?

对此爱因斯坦这样评价道:“普朗克提出了一全新的、从未有人想到的概念,即能量量子化的概念。”“该发现奠定了20世纪所有物理学的基础,几乎完全决定了其以后的发展。”

在这以前,人们总是认为,一切物理过程都是连续的。德国数学家、哲学家莱布尼茨曾明确指出,“自然无飞跃”。牛顿也认为,自然界中的所有变化必然以连续的方式发生。这种连续性的假设,是微积分的基础。牛顿庞大的体系,便建筑在这个地基之上,度过了百年的风雨。同样,18世纪和19世纪的科学家和哲学家也都认为,物理过程必定是连续的。而普朗克第一次将不连续性引进物理领域,把物理学构筑起来的连续性原理体系毫不留情地彻底打破,引发出一场最为反叛和彻底的革命,也是最具传奇和史诗色彩的革命。

基本量子的发现,开创了物理学的新时代,它表明:原来物理过程可以是不连续的,认为一切自然现象无限连续的观念是一种误解,应该放弃。正如德国物理学家劳厄所说:“普朗克的关于能量的 $h\nu$ 外延,不仅是对已有的物理学的改造,而且是一次革命。在以后的几十年内不仅越来越明显地显示出这一革命是多么深刻,而且也越来越显示出它是多么必要。借助于量子的观念,人们就能够进一步理解到在这以前,对于

物理上还是封闭的各种原子过程。”

一眼看来，普朗克公式 $E = h\nu$ 实在太过于朴实，但就像大智者往往若愚，简洁无华的它其实也是深藏不露的。毫不夸张地说，量子化才是世界的本质！一个简单普适的公式总结了普朗克辉煌的人生，也彻底打破了我们以往对世界的认识。

1920年，普朗克因发现量子这一成就而获得诺贝尔物理学奖。他在一次演讲中谦虚地说：“如果一个矿工发现了一座金矿。那是因为地下本来就有金子。我不去发现量子原理，也总有人会去发现它的。”物理学发展到一定阶段总要推出自己的代表人物。

光量子假说

普朗克创立的量子理论表明：一切都是不连续的，连续性的美好蓝图，也许不过是我们的一种想象。但是，如果我们接受量子理论就势必对现有物理学的种种基本观点来一番大的改造。正因为普朗克这个新理论实在是太革命了，虽然德国物理学会请他做了报告，可是没有一个人相信这个新观念。甚至连普朗克本人也觉得最好能把新旧理论统一起来。在后来一段时间，普朗克在寻找更好的办法把新观念纳入旧理论，就像牛顿后来用科学来证明上帝一样，一个新理论在诞生之初经常会表现得惴惴不安，未敢立即脱离它的母体。

正当普朗克孤立无援，而且自己也有4年时间裹足不前的时候，1905年，在瑞士的伯尔尼专利



图2 爱因斯坦在专利局

电子；而频率低的光线（比如红光、黄光）则一个电子也打不出来。其次，能否打击出电子，这和光的强度无关。再弱的紫外线也能够打击出金属表面的电子；而再强的红光也无法做到这一点。增加光线的强度，能够做到的只是增加打出电子的数量。比如强烈的紫光相对微弱的紫光来说，可以从金属表面打出更多的电子来。

总而言之，对于特定的金属，能不能打出电子，由光的频率说了算。而打出多少电子，则由光的强度说了算。

但是，科学家们很快就发现，他们陷入了一个巨大的困惑中。根据麦克斯韦理论，光是电磁波的一种，其波动性的王位，早已被高雅而尊贵的麦克斯韦钦点了。对于波动来说，波的强度便代表了它的能量。我们很容易理解，电子是被某种能量束缚在金属内部的，如果外部给予的能量不够，便不足以将电子打击出来。但是，照道理说，如果我们增加光波的强度，那便是增加它的能量啊，为什么对于红光来说，再强烈的光线都无法打击出哪怕是一个电子来呢？而频率，它无非是波振动的频繁程度而已。如果频率高的话，便是说波振动得频繁一些，那么照理说频繁振动的光波应该打击出更多数量的电子才对啊。然而所有的实验都指向相反的方向：光的频率，而不是强度，决定能否从金属表面打出电子；光的强度，而不是频率，决定打出的电子的数目。

地对编辑说：“如果您能在你们的年报中找到篇幅为我刊出这篇论文，我将感到很愉快。”这篇论文把普朗克 1900 年提出的量子概念推广到光在空间中的传播情况，提出光量子假设。论文认为：对于时间平均值，光表现为波动性；而对于瞬时值，光则表现为粒子性。这是历史上第一次揭示了微观客体的波动性和粒子性的统一，即光的波粒二象性。这个故事告诉我们，小庙里面有时也会出大和尚。

让我们再次重温一下光电效应和电磁理论不协调之处：电磁理论认为，光作为一种波动，它的强度代表了它的能量，增强光的强度应该能够打击出更高能量的电子。但实验表明，增加光的强度只能打击更多数量的电子，而不能增加电子的能量。要打击出更高能量的电子，则必须提高照射光线的频率。

提高频率！爱因斯坦灵光一闪， $E=h\nu$ ，提高频率，不正是提高单个量子的能量吗？而更高能量的量子，不正好能够打击出更高能量的电子吗？另外，提高光的强度，只是增加量子的数量罢了，所以相应的结果自然是打击出更多数量的电子！

爱因斯坦写道：“……根据这种假设，从一点所发出的光线在不断扩大的空间中传播时，它的能量不是连续分布的，而是由一些数目有限的、局限于空间中某个地点的‘能量子’（energy quanta）所组成的。这些能量子是不可分割的，它们

只能整份地被吸收或发射。”

组成光的能量子的这种最小基本单位,爱因斯坦后来把它们叫作“光量子”(light quanta)。一直到1926年,美国物理学家刘易斯才把它换成了今天常用的名词,叫作“光子”(photon)。

从光量子的角度出发,一切变得非常易懂了。频率更高的光线,比如紫外光,它的单个量子要比频率低的光线会有更高的能量($E=h\nu$)。因此,当它的量子作用到金属表面的时候,就能够激发出拥有更高动能的电子来。而量子的能量和光线的强度没有关系,强光只不过包含了更多数量的光量子而已,所以能够激发出更多数量的电子来,但是对于低频来说,它的每一个量子都不足以激发出电子,那么,含有再多的光量子也无济于事。

总之,爱因斯坦的光量子假说包含一个革命性的论断:光的能量是量子化的,只能是一份一份地发射或吸收。每一份的能量是 $h\nu$,不能有“半份”或“四分之一份”能量,这一点与麦克斯韦的电磁波理论是相悖的。在电磁波理论里,光波的能量是在空间上或时间上铺展开来的,都是可以无限细分的。

根据爱因斯坦的光量假设,当光子射向金属时,金属中的自由电子吸收了一个光子的能量 $h\nu$,电子把这部分能量用作两种用途:一部分用来克服金属对它的束缚,即消耗在逸出

功 A 上,另一部分转换为电子离开金属表面的初始动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 。根据能量守恒定律,应有

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A$$

这个方程称为光电效应方程。用这个方程圆满解释了光电效应。然而,对于爱因斯坦的解释,人们当时是表示怀疑的,因为普遍认为电磁辐射的能量是连续的,而爱因斯坦的解释在某种意义上是说,光不是连续的粒子,一束光是一粒一粒以光速运动的粒子流,这些粒子叫作光量子。实验物理学家用了许多时间,详细地检验了爱因斯坦的光电效应理论,到了1916年,它被完全证实了。这个理论的非凡成功,最终迫使科学家们在20世纪初重新考虑光的本质。今天,光的这一独特的存在形式,已经毫不含糊地被人们接受了。光在具有粒子性质的同时,也具有波动的性质。粒子是独立的、位置固定的和在空间与时间上是可测量的;波是连续的,它能传播到所有的空间和时间,其瞬间的影响遍及各处。这是人类第一次遇到的量子世界的新奇特征之一:粒和波的双重性。

1922年,爱因斯坦因发现“光电效应定律”而获得了诺贝尔物理学奖——事实上,他在相对论方面的贡献远大于此,只不过当时的诺贝尔奖评委认为相对论没有得到验证,而且真正懂得的人寥寥无几。

写到这里,顺便告诉读者:1905 年是物理学发展史上的奇迹年。在这一年,蜗居在瑞士专利局的爱因斯坦写出了 6 篇论文。3 月 17 日,是我们前面提到过的关于光电效应的文章,这成了量子论的奠基石之一。4 月 30 日,关于测量分子大小的论文,这为他赢得了博士学位。5 月 11 日和后来的 12 月 19 日,两篇关于布朗运动的论文,成了分子论的里程碑。6 月 30 日,题为《论运动物体的电动力学》的论文,这个不起眼的题目后来被加上了一个如雷贯耳的名称,叫作“狭义相对论”。9 月 27 日,关于物体惯性和能量的关系,这是狭义相对论的进一步说明,并且在其中提出了著名的质能方程 $E=mc^2$ 。爱因斯坦单枪匹马在如此短时间内做出如此巨大贡献,这在今日看来是无法想象的。为了纪念 1905 年的光辉,人们把一百年后的 2005 年定为“国际物理年”。

其实,如果站在一个比较高的角度来看历史,一切事物都是遵循特定的轨迹的,没有无缘无故的事情,也没有不合常理的事情。在时代浪尖里弄潮的英雄人物,其实都只是适合了那个时代的基本要求,这才得到了属于他们的无上荣耀。

玻尔的原子模型

1897 年,英国物理学家汤姆逊在研究阴极射线的时候,发现了原子中电子的存在,这打破了从古希腊人那里流传下来的“原子不可分割”的理念,明确地向人们表示:原子是可以继续分割的,它有自己的内部结构。由此,许多科学家都开始研究原子的结构,思考电子在原子中到底如何运动,一时出现了各种不同的模型。

1911 年,新西兰物理学家卢瑟福发现原子模型很像一个行星系统(比如太阳系),在这里,原子核就像太阳,而电子则是围绕太阳运行的行星。但是,这样的模型是不稳定的。因为带负电的电子绕着带正电的原子核运转,根据麦克斯韦电磁理论,两者之间会放射出强烈的电磁辐射,从而导致电子一点点地失去自己的能量,它便不得不逐渐缩小运行半径,直到最终“坠毁”在原子核上,整个过程只有一眨眼的工夫。换句话说,卢瑟福的原子是不可能稳定在超过 1 秒钟的。面对这

样的困难,卢瑟福勇敢地在伦敦出版的《哲学杂志》上,向所有物理学家宣布他的原子模型,并在文章中毫不讳言地说:“关于所提的原子稳定性问题,现阶段尚未考虑进行研究……但是我们的科学事业除了今天还有明天!”然而,当时他的模型根本没有引起学术界的重视,大家对这个模型十分冷淡,这使卢瑟福的满腔期望被一扫而空。

谁是卢瑟福濒临失败的原子模型的救星呢? 1911年9月来自丹麦的一位26岁小伙子尼尔斯·玻尔,并没有因为卢瑟福模型的困难而放弃这一理论,反而对卢瑟福模型很感兴趣。后来,史学家问过玻尔:“当时是不是只有你一个人感兴趣呢?”玻尔回答说:“是的,不过你知道,我主要不是感兴趣,我只是相信它。”



图5 玻尔

那么,玻尔如何解决卢瑟福原子模型存在的问题呢? 他的创新思想体现在何处呢? 他首先想到的是把当时由普朗克所提出的,后又由爱因斯坦所发展的量子观点用到他的模型中来。他认为在原子这样微观的层次上经典物理理论将不再成立,新的革命性思想必须被引入,这个思想就是量子理论。然而,要否定经典理论,关键是

新理论要能完美地解释原子的一切行为,应当说这是一个相当困难的任务。首先遇到的问题是在他量子化的原子模型里如何解释原子的光谱问题。当时,原子光谱对玻尔来说是陌生和复杂的,成千条谱线和各种奇怪的效应,在他看来太杂乱无章,似乎不能从中得出什么有用的信息。正当玻尔挠头不已的时候,他的大学同学汉森告诉他,瑞士的一位中学教师巴尔末提出了一个关于氢原子的光谱公式,这里面其实是有规律的。

什么是巴尔末公式呢?下面用原子谱线波长 λ 的倒数来表示,则显得更加简单明了:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5, \dots)$$

其中 R 是一个常数,称为里德伯(Rydberg)常数; n 是大于2的正整数。

巴尔末公式如此简单,却蕴藏着原子结构的精髓与原子光谱的规律,但在近30年中一直无人揭晓。1954年玻尔回忆道:“当我一看见巴尔末公式,一切都在我眼前豁然开朗了。”真是山重水复疑无路,柳暗花明又一村。在谁也没有想到的地方,量子得到决定性的突破。

我们再来看一下巴尔末公式,这里面用到了一个变量 n ,那是大于2的任何正整数。 n 可以等于3,可以等于4,但不能

等于 3.5,这无疑是一种量子化的表述。原子只能放射出波长符合某种量子规律的辐射,这说明了什么呢?我们回顾一下普朗克提出的那个经典量子公式: $E=h\nu$ 。频率 ν 是能量 E 的量度,原子只释放特定频率(或波长)的辐射,说明在原子内部,它只能以特定的量吸收或发射能量。于是,在玻尔的头脑中浮现出来:原子内部只能释放特定量的能量,表明电子只能在特定的“势能位置”之间转换。也就是说,电子只能按照某些确定的轨道运行,这些轨道必须符合一定的势能条件,从而使得电子在这些轨道间跃迁时,只能释放符合巴尔末公式的能量来。关键是我们现在知道,电子只能释放或吸收特定的能量,而不是连续不断的。不能像经典理论所假设的那样,是连续而任意的。也就是说,电子在围绕原子核运转时,只能处于一些特定的能量状态中,这些不连续的能量状态称为定态。你可以有 E_1 ,可以有 E_2 ,但不能取 E_1 和 E_2 之间的任意数值。电子只能处于这些定态中,两个定态之间没有缓冲地带,那里是电子的禁区,电子无法出现在那里。玻尔认为:当电子处在某个定态的时候,它就是稳定的,不会放射出任何形式的辐射而失去能量。这样就不会出现崩溃问题了。

玻尔现在清楚了,氢原子的光谱线代表了电子从一个特定的轨道跳跃到另外一个轨道所释放的能量。因为观测到的光谱线是量子化的,所以电子轨道必定也是量子化的,它不能

连续而取任意值。连续性被破坏,量子化条件必须成为原子理论的主宰。

玻尔创造性地将量子概念用到了卢瑟福的原子模型中,给出了量子化的原子模型,受到爱因斯坦、卢瑟福等人的赞许和肯定,爱因斯坦年迈时还这样评价:“即使在今天,在我看来,也是一个奇迹!这简直是思维上最和谐的乐章。”物质世界的和谐统一是历代科学家共同奋斗的壮丽目标。17世纪末,牛顿发现万有引力,把天上、地上的物体间的吸引力统一起来。19世纪,法拉第把电和磁统一起来,麦克斯韦进一步把光和电磁现象统一起来。20世纪初,爱因斯坦把光的粒子性和波动性和谐地统一起来,提出了光的波粒二象性,玻尔提出的关于原子结构的量子化模型又是物理世界和谐统一的典型例子。

玻尔所有的思想,转化成理论推导和数学表述,并以三篇论文的形式于1913年3月至9月陆续发表在《哲学杂志》上。这三篇论文分别题为《论原子和分子的结构》《单原子核体系》和《多原子核体系》,这就是在量子物理历史上划时代的文献,亦即伟大的“三部曲”。鉴于玻尔对量子物理的发展作出了重大贡献,1922年他荣获了诺贝尔物理学奖。

4

矩阵力学

——量子力学的第一种形式

我们知道,20 世纪初,普朗克、爱因斯坦和玻尔等创立了量子理论,但到 1925 年,还没有一种量子理论能以统一的结构来概括这一领域已经积累的知识,当时的量子力学可以说是本质上相互独立的、有时甚至相互矛盾的部分的混合体。为此,提出一个适合微观世界的量子表达形式的统一理论体系,便成为当时科学界的当务之急。

1925 年,德国物理学家海森堡提出了一种矩阵的数学形式来表达量子世界,这就成为量子力学的第一个版本——矩阵力学。

矩阵力学的思想出发点,是针对丹麦物理学家玻尔提出的原子结构模型中许多物理量(如电子轨道、位置



图 6 海森堡

等)都是一些不可以直接观测的量。反之,海森堡要用可以观测测量(如原子的谱线频率、强度等)来描述原子系统。他认为一切都不能臆想,要从事实——唯一能被观测和检验到的事实——推论出来。1925年7月的一天,海森堡关于原子谱线问题的计算有了结果。他说:“差不多是夜里三点钟,计算结果最终出来了。我深深地被震惊了。我很兴奋,一点也不想睡。于是,我离开房间,坐在一块岩石上等日出。”在计算中,他采用了一种二维表格来表示物理量,表中每个数据用横坐标和竖坐标的两个变量来表示。比如下面这个 3×3 的方块表格:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}$$

其实就是 3×3 矩阵。海森堡的表格和玻尔的原子模型不同,它没有作任何假设和推论,不包含任何不可观察的数据。但作为代价,它采纳了一种二维的庞大结构。然而,让人不能理解的是,这种表格难道也能像普通的物理变量一样进行运算吗?你怎么把两个表格加起来,或乘起来呢?海森堡准是发疯了。

海森堡坚信所有的物理变量都要按照这种表格的方式来改写。正如我们不能用 ν_x ,而必须用 $\nu_{x,y}$ 来表示电子频率一

人们把基于粒子坐标和动量等物理量表示成矩阵的量子力学称之为矩阵力学。矩阵力学解释了原子领域的一系列问题,其中包括氢原子的谱线问题、光谱在电磁场中的分裂、光的散射等。但由于矩阵算法当时还不为物理学家所熟悉,大家早已习惯了普通的以字母和符号代表的物理公式,认为矩阵力学建立的基础是瞎猜也不为过,所以矩阵力学并没有被物理学家所接受。但是,有人看出了其中的非凡之处,英国物理学家狄拉克就指出,海森堡的矩阵力学表明,量子力学用到的物理量,可能是非对易关系的,即不满足乘法交换律。可以想见矩阵力学带给当时物理学的冲击,怎么粒子的坐标、动量这些我们习惯了的量突然变成了不可对易的怪物了呢?人们一时还转不过弯儿来。后来我们将看到,物理操作的非对易性是量子力学的核心。量子力学的对易关系表明所要观察的两个力学量之间是否满足不确定关系,也就是测量一个的时候会干扰到另一个。比如观测 A , 对于非对易关系的力学量 B , 在测量 A 的同时也变化了;反之亦然。对于满足对易关系的力学量,无论如何测量都不会影响其他的对易关系的力学量。

总之,量子力学是一个最不可思议、最有颠覆性的物理理论。比如说在牛顿力学中,我们用六个实数描写一个粒子的状态。这六个数,三个数是粒子在三维空间的位置,三个数是

粒子的动量。但是在微观世界中,对粒子状态如此描述就是错误的。量子力学告诉我们,描写粒子的位置和动量的这些物理量,根本不是数,而是矩阵。在这里,动量和位置这两个物理量不遵守乘法交换律,也就是说:电子动量 \times 电子位置 \neq 电子位置 \times 电子动量,这是什么原因?很明显这个公式代表先测电子动量,再测电子位置,与先测电子位置再测电子动量,其结果是不一样的,而这又说明什么呢?这是因为观测电子动量的行为影响到电子位置的数值,反过来也一样。这叫作非对易性。这简直是莫名其妙。但这莫名其妙的理论却能正确地反映微观实验观测到的结果。许多传统的物理量,现在都要看成是一些独立的矩阵来处理。从数到矩阵,这真是神来之笔。

5

波动力学

——量子力学的第二种形式

爱因斯坦提出了光的波粒二象性概念,即光既有波动性,又有粒子性,这才是光的本性。但是,在1923年,法国一个学文科的、半路出家投身物理的年轻人——德布罗意提出了一个更加大胆的思想:光波是粒子,那么粒子是不是波呢?就是说光的波粒二象性是不是可以推广到一切实物粒子(如原子、电子等)呢?就像当年法拉第由电变磁推想磁变电一样,德布罗意思



图7 德布罗意

路一开,立即拓出一片新的天地。1923年他接连发表三篇论文,提出“物质波”的新概念。他坚信大至一个行星、一块石头,小至一个电子,都能产生物质波。物质波有其独特之处,

它能在真空中传播,不要介质,因此不是机械波。但它又可以由不带电的物体运动产生,因此它又不是电磁波。

第二年,1924年,德布罗意将自己的这个新思想,写了一篇博士学位论文《关于量子理论的研究》。可以说这是当时物理学界独一无二的新观点。什么?电子居然是一个波?!这未免让人感到太不可思议了。许多人看了他的论文都摇头:他到底是一个天才,还是一个疯子?其实,伟大的智慧与疯狂几乎联系在一起,它们之间的界限微乎其微。但是德布罗意的导师朗之万对这件事总是不放心,便将论文寄给爱因斯坦审阅。

爱因斯坦真不愧为一个理论物理大师,他刚读完论文就拍案叫绝,并立即向物理学界的几个著名学者写信,吁请对这个新思想给予关注:

请读一读这篇论文吧,这可能是一个疯子写的,但只有疯子才有这种胆量。它的内容很充实。看来粒子的每一个运动都伴随着一个波场,这个波场的物理性质虽然我们还不清楚,但是原则上应该能够观察到。德布罗意干了一件大事,另一个物理世界的那幅巨大的帷幕,已经被轻轻地掀开了一角。

德布罗意还应用爱因斯坦的相对论,推出了物质波的波

薛定谔方程中,引入了一个全新的数学量——波函数 Ψ ,它反映了微观粒子的波粒二象性。这样,微观粒子的状态就由波函数来描述:

$$i \frac{h}{2\pi} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H\Psi$$

式中, i 为虚数符号, h 为普朗克常数, Ψ 为波函数, H 为哈密顿函数。

当薛定谔把这个方程用于氢原子时,能够得到像玻尔一样的结果,而无须另外假设其他条件。

薛定谔创立的波动方程是一个偏微分方程,它是连续的而不是分立的,掌握起来比较容易,很快就被物理学家所接受。一些著名的物理学家给予充分的肯定。普朗克说:“这一方程奠定了近代量子力学的基础,就像牛顿、拉格朗日和哈密顿创立的方程在经典力学中所起的作用一样。”玻尔说:“这一时期中登峰造极的事件,就是薛定谔在 1926 年建立了一种更容易掌握的波动力学。”

在薛定谔方程中,波函数 Ψ 是一个复函数,而在经典力学中的声波或电磁波的波动方程中只包含实数,并没有复数出现。因此,声波或电磁波比较容易描述,而且是可以看得见的,理解起来自然容易。而作为复数的波函数 Ψ 所描述的波,如电子的波是看不见的,它到底是什么性质的波,其真实

面目充满了神奇。这就需要对波函数 Ψ 的物理意义作出解释。

1926年,德国物理学家波恩在《论碰撞过程的量子力学》的论文中,提出了波函数的统计解释。他认为波函数是概率波,用来表示可以发现电子的概率。这个解释很快成为物理学界公认的正统解释。

在波恩的解释中,提出了一个思想实验(假设没有技术限制所进行的实验,设想它会得到什么样的结果)。假设在一个箱子中放入一个电子并将箱子封闭。如将电子看作波,作为波的电子在箱子里就应该以比较均匀的状态分布。接下来,我们在箱子中放入一块隔板,将箱子分割成两个空间。这样一来,电子的波也应该被一分为二。也就是说,如果电子的波像水面的波那样以分散的状态分布,箱子中的波就应该被隔板从中一分为二。

不过,请大家思考一下,我们向箱子里放了一个电子,在这种情况下,被隔板一分为二的电子的波,究竟是指什么呢?难道是半个电子吗?事实上,并没有被切成一半的电子。因为电子是最小的微粒,即基本粒子的一种。也就是说,一个电子是不可能再被细分的。即便是在技术先进的今天,人们仍然不能将一个电子任意分割。

通过这个思想实验可以得出,电子的波具有和其他的波

和波动性之间的矛盾在物理学中会得不到解决的。”由于薛定谔和波恩对量子力学基础研究所作的重要贡献,他们分别于1933年和1954年获诺贝尔物理学奖。

然而,波动力学的创立者薛定谔却始终不能容忍量子力学的统计解释。他总希望能够回到经典物理学上去,因为他认为,经典物理学具有无条件的自然必然性和清晰的概念。薛定谔甚至设计了一个猫的实验,来说明统计解释是荒谬的。同样,对量子理论发展作出过贡献的爱因斯坦,也一直反对量子力学的统计解释。1926年,他在给波恩的信中说:“量子力学固然是堂皇的,可是有一种内在的声音告诉我,它还不是那么真实的东西,这个理论说得很多,但一点也没有真正使我们更加接近‘上帝’的秘密。我无论如何都深信,上帝不是在掷骰子。”对这个问题,爱因斯坦与玻尔之间展开了40年的争论。争论的实质是因为量子力学中引进了统计概念,这就使它的本质变成统计性的。这样,量子力学中的规律已经不再是严格决定论的规律,而是要服从概率论的统计规律。玻尔甚至认为:大自然的一切规律都是统计性的,经典因果律只是统计规律的极限。爱因斯坦则表示不同意对自然界的描述本质上是统计性的,并认为量子力学理论不完备。他公开而直言不讳地说:“上帝是不会玩掷骰子游戏的。”

谈到波动力学,有必要提一下它的创始人对生命科学的重大贡献。1944年57岁的薛定谔以他的《生命是什么》一书的出版震惊了科学界,在这本书中他提出了三个观点:

(1) 生命以负熵为生。

(2) 遗传是以密码形式通过染色体来传递。

(3) 生命体系中存在量子跃迁现象,X射线照射可以引起遗传的突变就是证据。

薛定谔的贡献,是他将生命现象的解释从细胞水平提高到了更微观水平——分子水平。

最后,让我们回顾一下量子力学发展过程所经历的两条迥然不同的道路。第一条道路是从直接观测到的原子谱线出发,引入矩阵的数学工具,用这种奇特的方块表格建立起新的力学大厦。另一条道路,是以德布罗意的理论为切入点,利用经典的哈密顿方程,构造一个体系的新函数——波函数 ψ ,然后代入德布罗意关系式和变分法,最后求出了方程及其解答。两条道路长期对峙和激烈争论,各自都认定自己的那套方法才是唯



图10 狄拉克

一正确的。但是,很快人们就知道,从矩阵出发,可以推导出波动函数的表达形式来。而反过来,从波函数也可以导出矩阵,这两种理论被数学证明是等价的。1930年狄拉克出版了那本经典的量子力学教材《量子力学原理》,将两种力学完美地统一起来,完成了量子力学的普遍综合。

测不准原理

在量子力学创立的时期，正是实证主义盛行的时候，实证主义者认为，只有能观察到的量才是可以使用的，必须把一切不可观察的量排除出去。薛定谔就说过，矩阵力学的斗士们所主张的那种不连续的物理量是非理性的，因为它是不能看到的、非直观的。海森堡坚决反驳这样的观点。这种争论在当时是很激烈的。在量子力学中，电子轨道是看不到的，粒子的位置和速度也是不能同时观察到的量。实证主义者认为，这些量就不能在理论中出现。但是在任何一门物理理论中都有一些物理量是观察不到的。气体分子运动中的分子就是看不到的。在波动力学中，波函数也是看不到的；在一定条件下，能观察到的量只是波函数的平均值，或者概率。因此，不能要求在物理理论中只包括可观察的量。这时，只能要求理论所描述的世界，应当与实验中观察到的世界一致。

海森堡渴望着对位置、速度两个概念作出新的解释。

1927年,他发表了具有历史意义的论文《量子理论运动学和动力学的直观内容》,其中指出:“决定微观粒子的运动状态有两个参数:微观粒子的位置及其速度。但是永远也不可能在同一时间里精确地测定这两个参数;永远也不可能在同一时间里知道粒子在什么位置,速度有多快和运动的方向。如果要精确测定微粒在给定时刻的位置,那么它的运动速度就遭到破坏,以致不可能重新找到该微粒。反之,如果要精确测定它的速度,那么它的位置就完全模糊不清。”这就是著名的测不准原理(或称不确定性原理)。

测不准原理断言:在经典力学中,一个质点的位置和动量(物体只有运动起来,有了速度,才有动量,速度与动量关系密切)是可以同时精确测定的。例如飞机来了,雷达可以把飞机的位置和速度都准确测定。而在微观世界中,要同时精确测定粒子的位置和动量是不可能的。我们对一个量测量得越准,则另一个“共轭”量的不确定性就越大。海森堡给出了测不准关系式:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{2}$$

式中 Δx ——粒子坐标的不确定度(或坐标测量误差);

Δp_x ——粒子动量在 x 分量上的不确定度(或动量测量误差);

h ——普朗克常数。

测不准关系式告诉我们,微观粒子的坐标偏差和动量偏差的乘积永远等于或大于常数 $h/2$ 。也就是说,如果微观粒子的坐标越确定(Δx 越小),则其动量就越不确定(Δp_x 越大);反之亦然。进一步说,如果粒子的动量是完全确定的($\Delta p_x \rightarrow 0$),则其坐标就完全不确定了($\Delta x \rightarrow \infty$);反之亦然。总之,微观粒子的坐标和动量,不可能同时具有确定的值(Δx 和 Δp_x , 不能同时为零)。也就是说,根据这个原理,我们要想精确地测定粒子的位置,就无法测定它的速度;反过来,要想精确地测定其速度,就无法测定它的位置。或者我们折中一下,同时获取一个比较模糊的位置和比较模糊的速度。

人们当然知道,任何物理量都不能测得完全精确。然而,人们相信随着技术的进步,方法的创新,认识的革命,会不断减小测量误差,提高精度,物理量的测定会越来越精确。正像我们在测量恒星的岁差时所看到的那样,并且认为这一过程可以无止境地进行下去。然而,根据海森堡的测不准关系式来看,事实上并不是这样,可达到的精确性是有一定限度的,而这并不是由于我们的测量仪器不够完善造成的。测不准关系是微观粒子具有波粒双重性的必然结果。

海森堡认为,当我们的研究工作由宏观领域进入微观领

域的时候,就会遇到一个矛盾:观测的仪器是宏观的,而研究的对象是微观粒子;宏观的测量仪器必定会对微观粒子产生干扰,这种干扰又会对我们的认识产生影响;人们只能用反映宏观世界的经典概念来描述从宏观仪器所观测到的结果。这种经典概念在描述微观粒子时不会不受到限制。在宏观世界里,我们在观察任何现象以及测量物体的性质时,不会对所观测的对象产生显著的影响;然而,在微观世界里,由于粒子的质量太小,无论我们采取什么样的观测手段,总会对被观测的对象产生实质的干扰。

在经典力学中,因为能同时确定质点的位置和速度,以轨道为依据,就能由质点的现在状态推断其过去和未来的状态,就能在所有现象之间建立起稳定、必然的因果联系。从而使经典力学成为决定论的。然而,在量子力学中,由于测不准原理,我们不能同时精确地测定粒子的位置和速度,得不到一个准确的初始状态,也就排除了对未来事件作严格预言的可能。正如霍金说:“不确定性原理对我们的世界观有非常深远的影响。甚至过了70多年以后,它还不为许多哲学家所鉴赏,仍然是许多争论的主题。不确定性原理使拉普拉斯科学理论,即一个完全决定的宇宙模型的梦想终结。如果人们甚至不能精确地测量宇宙的现在状态,就肯定不能准确地预言将来的事件了。”

从波函数的统计解释和测不准原理,我们得知量子力学的统计性质是本质的,不可避免的。因而它对决定论的冲击就更加有力。玻尔说,量子力学导致“决定论理想的无可挽回地放弃。”波恩说:“量子定律的发现宣告了严格决定论的结束,而这种决定论在经典时期是不可避免的。这个结果具有重大的哲学意义。在相对论改变了空间和时间的观念之后,现在又必须修改康德的另一个范畴——因果性。这些范畴的先验性已经保持不住了。不过,这些原理原来所占据的位置现在当然也不会空着,它们被新的表述来接替了。对于空间和时间里的情况,换成了明科夫斯基的四维几何规律。对因果性的情况,同样也有一个更普遍的概念,这就是概率的概念。”

7

量子纠缠

7.1 几个基本概念

7.1.1 宏观世界与微观世界

宏观世界是我们看得见、摸得到的世界,适用于和人同尺度的现象;微观世界是指分子、原子、电子等微小粒子层面的物质世界。描述两个世界的物理法则是不同的。牛顿力学和相对论用确定性方法(或决定论)描述宏观世界。在这里,一切事物的运动、变化都遵循必然性的规律;量子力学用统计方法描述微观世界,在这里,一切瞬息万变的微观态只能给出一个可能、概率的结果。

这样,我们就有了描述物理世界的两种不同的方法:确定性方法与统计方法。两种描述方法是平等的伴侣,同样有用、同样重要、同样为科学家所接受;但它们又是这样的不同、

不可调和的不同,是基本精神完全不同的两种描述方法。

决定论在人们思想中已经根深蒂固,连爱因斯坦这样伟大的物理学家也坚决反对统计描述方法,他相信“上帝不掷骰子”。骰子是什么东西?它应该出现在澳门和拉斯维加斯的赌场中。但是,物理学?不,那不是它应该来的地方。骰子代表了投机,代表了不确定性,而物理学是一门最严格、最精密,最不能容忍不确定性的科学。但是,当波恩于1926年7月将统计解释引进薛定谔的波动方程之后,概率这一基本属性赋予了量子力学,标志着一统天下的决定论在20世纪悲壮谢幕!

7.12 量子力学的波函数

在经典力学中,用质点的位置和动量(或速度)来描述宏观质点的状态,这是质点状态的经典描述方式,它突出了质点的粒子性。由于微观粒子具有波粒二象性,粒子的位置和动量不能同时确定,因而质点状态的经典描述方式不适用于对微观粒子的描述。

在量子力学中,为了定量地描述微观粒子的状态,便引入了波函数。一般讲,波函数是坐标和时间的复函数,并用 $\psi(r,t)$ 表示。波函数 ψ 的绝对值的平方,对应于微观粒子在某处出现的概率密度。在电子双缝干涉实验中,我们观察到

电子在屏幕上各个位置出现的概率密度并不是常数,有些地方出现的概率大,即出现干涉图样中的“亮条纹”;而有些地方出现的概率却可以为零,没有电子到达,显示“暗条纹”。据此可以认为波函数所代表的是一种概率的波动,它既不描述粒子的形状,也不描述粒子的运动轨道,它只给出粒子运动的概率分布。波函数概念的形成正是量子力学完全摆脱经典的观念,走向成熟的标志。

7.13 波函数坍缩

在宏观世界中,因为宏观物体只能显示粒子性一种属性,它的波动性根本显示不出来,所以宏观物体构成了一种物理实在,与你的观察无关。而微观粒子却有粒子性和波动性两种属性,在这种情况下,你的观察就会起到决定性作用了。

这实际上就是“波函数坍缩”的概念。根据哥本哈根学派的解释,在一次测量和下一次测量之间,除抽象的概率波函数以外,这个微观物体不存在,它只有各种可能的状态;仅当进行了观察或测量,粒子的“可能”状态之一才成为“实际”的状态,并且所有其他可能状态的概率突变为零。这种由于测量行为产生的波函数的突然的、不连续的变化被称为“波函数坍缩”。比如在电子双缝干涉实验中,每个电子落在屏幕上都是一次波函数坍缩。

越多的物理实验(如电子的双缝衍射实验)所验证,这是微观世界中最重要性质,也是量子力学的核心内容。

7.15 定域性与非定域性

定域性又称局域性。1935年爱因斯坦等人给出了定域性假设:“由于在测量时两个体系不再相互作用,那么,对第一个体系所能做的无论什么事,其结果都不会使第二体系发生任何实在的变化。这只不过是两个体系之间不存在相互作用这个意义的一种表述而已。”这就是说,如果两个体系没有相互作用,其中一个体系发生的任何变化不会导致另一个体系发生变化。

定域性的英文是 locality,其词义是:在空间中占有一定位置的事实或性质。非定域性由前缀 non 与 locality 构成 nonlocality。从词义来看,非定域性表示与定域性的“非”“不”“无”的这样一种性质,也就是说,非定域性应作定域性的否定性理解。非定域性表示没有定域性的那样一种性质。

相对论的巨大成功让人相信,定域性是一切物质相互作用应当遵守的法则,任何物理效应包括信息传递都不可能以大于光速的速度传递。然而量子力学让人颇感意外。1964年,贝尔提出了检验定域性的方法——贝尔不等式。贝尔指

出所有定域性理论都有一个界限,即贝尔不等式,而一系列实验表明量子力学可以突破这个界限,大自然是允许这种非定域关联的。与定域性相悖,量子世界是非定域性的。简单地说,量子的非定域性是指,属于一个系统中的两个物体(在物理模型中称为粒子),如果你把它们分开了,有一个粒子甲在这里,另一个粒子乙在非常遥远的地方。如果你对任何一个粒子(假设粒子甲)扰动,那么瞬间另一个粒子乙就能知道,并作出相应的反应。这种反应是瞬时的,超越了我们的四维时空(在普通三维空间的长、宽、高三条轴外又加了一条时间轴),是非定域性的。

7.1.6 物理实在

物理学研究物质世界,必须认识客观世界的实在性。那么什么是“实在”呢?最质朴的含义就是实实在在,是真实的,不是虚假的,与人的主观意识无关的。或者说,“实在”就是它本来的那个样子,人的意识不能把它想怎样就怎样,但是意识可以反映它。

在我们头脑中,客观世界的定域性和实在性是根深蒂固的,定域性是指某个时刻一个物体的位置是明确的;实在性是指客观世界不依赖于人的意识而独立存在。然而量子力学的结论是惊世骇俗的。玻尔认为,在量子世界中,所谓的定域性

是不存在,而实在性,从物理学角度也是无法确定的。按照哥本哈根学派的解释,不存在一个客观的、绝对的世界。唯一存在的,就是我们能够观测到的世界。测量是新物理学的核心。测量行为创造了整个世界。这种理论是大多数人所不愿接受的,我们一般会毫不犹豫地认为这个世界是实实在在存在的,眼前的电脑、屋外的果树、鲜花,一切的一切,都是实实在在地待在那儿,并不会因为我们注意不到就不存在。为保卫经典世界的实在性,一些科学家不遗余力地提出关于量子力学的不同解释。其中爱因斯坦等提出的隐变量理论认为,我们不清楚粒子的行为是因为暂时还没有找到隐藏的变量,粒子其实和乒乓球一样是经典存在的。然而,理论必须由实践来检验。后来,贝尔不等式的实验结果不支持隐变量理论。2000年,潘建伟,Bouwmeester、Daniell 等人在《自然》杂志上报道,他们的实验结果再次否定了定域的隐变量理论。

量子力学表明,微观物理“实在”既不是波,也不是粒子,真正的“实在”是量子态。微观体系的实在性还表现在它的不可分离性上。量子力学把研究对象及其所处的环境看作一个整体,它不允许把世界看成是由彼此分离的、独立的部分组成的。

一定会选择“左”。事实上,这种选择是它被观测的那一刹那才做出的,并没有先兆。关键在于,当 A 随机地做出一个选择时,远在天边的 B 便一定要根据它的决定而做出相应的坍缩,变成与 A 不同的状态,以保持总体守恒。那么,B 是如何得知这一遥远的信息的呢? 难道有超过光速的信号来回于它们之间?

假设有两个观察者在宇宙的两端守株待兔,在某个时刻,他们同时进行观测: 一个观测 A,另一个观测 B。那么,这两个粒子会不会因为距离过于遥远,一时无法对上口径,而仓促间做出手忙脚乱的选择,比如两个同时变成了“左”或“右”? 显然是不太可能的,不然就违反了守恒定律。那么是什么让它们之间保持心有灵犀的默契,当你是“左”的时候,我一定是“右”?

爱因斯坦等人认为,既不可能有超过光速的信号传播,那么说粒子 A 和 B 在观察前是“不确定的幽灵”是难以自圆其说的。唯一的可能是两个粒子从分离的一刹那开始,其状态已经客观地确定了。后来人们的观测只不过是得到了这种状态的信息而已。就像经典世界中所描绘的那样。粒子在观测时才变成真实的说法显然违背了相对论的原理,它其中涉及瞬间传播的信号。这个诘难以三位发起者的首字母命名,称为“EPR”佯谬。

这是爱因斯坦和玻尔思想基础的尖锐冲突。玻尔认为，当没有观察的时候，不存在一个客观独立的世界，所谓“实在”只有和观测手段连起来讲才有意义。在观测之前，并没有“两个粒子”，而只有“一个粒子”。A 和 B“本来”没有什么自旋，直到我们采用某种方式观测了它们之后，所谓的“自旋”才具有物理意义，两个粒子才变成真实，变成客观独立的存在。但在那以前，它们仍然是互相联系的一个虚无整体，对其中任一个的观察必定扰动了另一个的状态。并不存在什么超光速的信号，两个遥远的具有相反自旋的粒子本是协调的一体，之间无须传递什么信号。其实是这个系统没有实在性，而不是没有定域性。

EPR 佯谬其实根本不是什么佯谬，它最多表明了，在“经典实在”观看来，量子理论是不完备的，这简直是废话。但是在玻尔那种“量子实在”观看来，它是非常完备和逻辑自洽的。

7.3 薛定谔“猫”佯谬

量子力学创立以来，量子理论的基础仍笼罩着一层扑朔迷离的浓雾，量子力学存在着不同的解释。虽然年轻一代物理学家绝大多数接受了量子力学的正统解释——以玻尔为首的哥本哈根学派提出的一整套对量子理论的诠释。但是，对

哥本哈根观点持异议的科学家,形成了以最有威望的爱因斯坦为首的非正统学派,其中包括提出物质波思想的物理学家德布罗意,建立量子力学波动方程的薛定谔等,他们同玻尔、海森堡等人展开了激烈的争论,提出了不少思想实验和佯谬与哥本哈根学派的观点抗衡。



图 13 薛定谔“猫”悖论

1935年,薛定谔发表了题为《量子力学的现状》论文,文中提出一个“猫”佯谬,大意是,在一个封闭的箱子里放上一只猫,箱子里面用盖革计数器一端连着一个盛有剧毒氰化物的封闭玻璃瓶,另一端连着盛有美味食物的瓶子。盖革计数器管中有一小块放射性物质,非常小,在一小时内只有一个原子衰变。当一个原子衰变,就会通过盖革计数器管触发小锤,或者使含剧毒玻璃瓶破裂,必定毒死猫;或者使食物玻璃瓶破裂,猫就是活的。按照经典世界规则,一小时结束时,猫不是死就是活,二者必居其一。

然而按照量子力学,箱内整个系统处于死态、活态的叠加态,即猫是半死半活的,这是一只又死又活的猫。薛定谔认为,从量子力学的统计性会得出这样荒谬的结论。薛定谔的说法是没有道理的。实际上,在没有開箱子之前,就只能用统计方法来估计箱子里的情况,猫死猫活的可能各占 50%;只要打开箱子,就可以看到猫是死了还是活着,它不会处于死活两种状态之间。霍金说:“如果打开箱子,就会发现该猫非死即生。但是在此之前,猫的量子态应是死猫状态和活猫状态的混合。有些科学哲学家觉得这很难接受,猫不能一半被杀死一半没被杀死。他们断言,正如没有人处于半怀孕状态一样。使他们为难的唯一原因在于,他们隐含地利用了实在的一个经典概念,一个对象只能有一个单独的确定历史。量子力学的全部要点是,它对实在有不同的观点。根据这种观点,一个对象不仅有单独的历史,而且有所有可能的历史。大多数情形下,具有特定历史的概率会和具有稍微不同历史的概率相抵消;但在一定情形下,邻近历史的概率会相互加强。我们正是从这些相互加强的历史中的一个观察到该对象的历史。在薛定谔猫的情形,存在两种被加强的历史。猫在一种历史中被杀死,在另一种中存活。两种可能性在量子理论中共存。因为有些哲学家隐含地假定猫只能有一个历史,所以他们就陷入这个死结而无法自拔。”

的光子本身并不被传输。这一成果使原则上完全保密的密码通信手段在实验上成为可能,也使得进行快速量子计算所必需的基本单元操作成为现实。该篇论文分别于 1997 年入选欧洲物理学会“年度国际十大物理学新闻”,美国物理学会“年度国际十大物理学新闻”;于 1998 年入选美国 Science“年度国际十大科技新闻”;于 1999 年入选英国 Nature 特刊“百年物理学 21 篇经典论文”,入选中国国家科学技术部“1999 年基础研究十大新闻”。

(3) 量子纠缠是量子信息的基础,由此催生出一系列的量子信息技术,主要包括三个方面:利用光子通信可以实现原理上无条件安全的通信方式;利用量子计算可以实现超快的计算能力;利用量子精密测量可以在测量精度上超越经典测量的精度极限。

质子,有个中子就有反中子,等等。这是一个神奇的发现!

量子论的建立是人类理性思维与科学发展的一个高峰。英国杂志《物理学世界》在 100 位著名物理学家中选出 10 位最伟大人物中就包含了本书所提到的 6 位物理学家,他们是爱因斯坦(排名第一)、玻尔(排名第四)、海森堡(排名第五)以及排名第八、九、十的狄拉克、薛定谔和卢瑟福。这足以说明 20 世纪量子论的创立和发展在物理学中所占的重要地位。

人类社会的进步都是走在基础科学发现的大道上。量子论是 20 世纪最伟大的科学发现之一,它的创立与发展已经并将继续引发一系列划时代的技术创新,其中量子信息技术、量子计算技术和量子通信技术具有巨大的潜在应用价值和重大的科学意义,正引起国际社会的密切关注。

者,但后来他却远而疑之,这是一个多么令我们伤心的悲剧啊。从此他在孤独中摸索前进,而我们则失去了一位领袖和旗手。”非常令人感动的是 1962 年 11 月 18 日玻尔去世前夕,他的工作室黑板上还画着一个 1927 年与爱因斯坦争论时,爱因斯坦设计的“光子箱”草图。此时,爱因斯坦已去世七年,玻尔仍在以这次争论激励自己,力求从爱因斯坦那儿得到更多灵感和启迪。

量子论的其他解释

量子论揭开了微观世界不可思议的现象,而使用哪种解释方法对现象进行诠释,称为“解释问题”。其中哥本哈根解释被大多数人所接受,被视为量子力学的正统(或主流)解释。不过也有人提出了一些别的解释来挑战哥本哈根解释。尽管这些解释受到很多非议,但是怀疑是科学进步的动力,了解一些不同的声音也可以开阔思路。下面将对几种解释做简要介绍。

10.1 隐变量解释

对经典思想的留恋使一些物理学家对哥本哈根学派的正统观念产生质疑,他们渴望回到熟悉的经典家园。20 世纪 50 年代初,玻姆终于找到一条返回经典家园的隐变量之河,他的理论再一次将人们带回到那个确定性的经典世界之中。

根学派的清规戒律,并让人们看到量子现象背后的微观实在是可以存在的。可以说,玻姆理论巧妙地综合了爱因斯坦和玻尔的思想,一方面,它保留了爱因斯坦所坚持的实在性、因果性和决定论,这体现在粒子的客观存在和它的连续运动的轨迹上;另一方面,它又保留了玻尔的整体思想,这体现在作为势场的波函数和它所产生的量子势上。当然,玻姆隐变量理论也不可避免地舍弃他们两人所珍爱的一些东西,如爱因斯坦所坚持的定域性和玻尔所强调的非连续性。

玻姆理论深深吸引了一位在欧洲高能物理实验室工作的物理学家贝尔,正是由于贝尔深信隐变量的存在,他才决心对隐变量进行深入的探寻,并因此发现了被人称为“科学中最深远的发现”的贝尔不等式,这对于贝尔来说却是事与愿违,它让量子巨轮离开隐变量的经典之岸越来越远。贝尔不等式告诉我们任何与量子力学具有相同预测的理论将不可避免地具有非定域性特性。具体地说,量子力学预言在相互纠缠的微观粒子(如电子、光子等)之间存在某种非定域关联,如果我们对其中的一个粒子进行测量,另一个粒子将会瞬时地感应到这种影响,并发生相应的状态变化,无论它们相距多远。

美妙的贝尔不等式首次清晰地揭示了量子世界的神奇特性——非定域性,并使人们第一次有可能通过实验来直接验证这种量子非定域性的存在。至今,人们已进行了大量实验

断地膨胀,形成了今天的宇宙。奇点处于没有任何物质(而且既没有时间也没有空间)的状态,从奇点产生了无数的微粒,形成了构成星体或人类身体的物质。

如果将量子论应用到宇宙的历史中会怎样呢?由于奇点处于没有任何物质的真空状态,因此是否能够产生光子等微粒,在量子论上就属于一个概率问题。艾弗雷特认为,在这一时刻,宇宙应该分支成产生了微粒的宇宙和未产生微粒的宇宙。这种可能性的数量不断产生分支,形成众多宇宙中的一个,就是我们现在生存的宇宙。同时,还存在着一个有我存在的宇宙或没有我的宇宙等平行宇宙。于是,我们所在的世界分支成为复数的世界。

那么,让我们用多世界解释来思考一下“薛定谔猫”的问题。前面我们已经讨论过,将猫放入一个存有放射性物质的箱子之中,经过1小时,放射性物质引起原子核衰变的概率为50%,这时不知不觉中,在箱子外的观测者的世界分支为两个。一个是观测者所在的世界中,箱子中的放射物质引起原子核衰变,因此释放出毒气,杀死了猫;而另一个则是观测者所在的世界中,箱子中的放射性物质没有引起原子核衰变。因此没有释放出毒气,猫活了下来。于是,第一个世界中的观测者打开箱子,发现猫已经死了;而第二个世界中的观测者打开箱子,发现猫还活着。就这么简单。所谓半生半死的猫、波

函数坍缩何时发生、微观和宏观的边界在何处等问题一概不会存在,任何地方都不存在悖论。

多世界解释的最大优点,就是不使用薛定谔方程无法导出的“波函数的坍缩”这一假设。当然还存这样的疑问,即猫活着的世界和猫死掉的世界真的并行存在吗?这是多世界解释没有弄清楚的问题。

实际上,从多世界理论很容易推出一个怪论:一个人永远不会死去!在死和活的不断分裂中,总有一个分支是活的,所以人总在某个世界中活着。这个怪论被美其名曰“量子永生”。从此看来,战场上士兵也不必害怕敌人的子弹了,即使在这个世界中弹了,在另一个世界却不会中弹,还会继续活下去。怎么感觉越来越像神学了?

多世界解释否定了有一个单独的经典世界的存在,而认为实在是一种包含很多世界的实在,它的演化是严格决定论的。然而,有一个问题却使多世界信奉者苦恼:为什么我们只能感知到确定的经典世界,而没有感知到其他的叠加态平行世界呢?此外,正如正统哥本哈根解释不能告诉我们波函数为什么,以及何时发生坍缩一样,多世界解释也不能告诉我们宇宙为什么,以及何时会发生分裂。而多世界只不过用宇宙分裂来代替波函数坍缩而已,它仍然未解决(测量)问题。关于波函数坍缩问题,至今仍是困扰人类的量子谜题。要知道,它

已难倒了 20 世纪的所有伟大人物。

10.3 退相干解释

何为退相干过程？简单讲，它就是消除量子系统的相干性。设被测系统 S 的状态为 $|\psi\rangle = a|\psi_1\rangle + b|\psi_2\rangle$ ，其密度矩阵为

$$\rho = |\psi\rangle\langle\psi| = |a|^2 |\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |b|^2 |\psi_2\rangle\langle\psi_2| + ab^* |\psi_1\rangle\langle\psi_2| + a^*b |\psi_2\rangle\langle\psi_1|$$

ρ 表达式右边的前面两项为对角项：

$$\rho_d = |a|^2 |\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |b|^2 |\psi_2\rangle\langle\psi_2|$$

ρ 表达式右边的后面两项为非对角项：

$$\rho_{nd} = ab^* |\psi_1\rangle\langle\psi_2| + a^*b |\psi_2\rangle\langle\psi_1|$$

在密度矩阵 ρ 的表达式中，对角项表示经典关联；非对角项表示相干。退相干过程就是使密度矩阵 ρ 的非对角项消失，仅有对角项存在，也就是使原系统 S 所具有的相干性消失掉，而仅有经典关联存在。

在实际的物理模式中，有许多的相干模式，但基本思想没有变，即借助环境使被测系统与测量仪器的相干性消除掉。

我们知道，被测系统与测量仪器所构成的相干叠加态，只有在与世隔绝的情况下才能够一直维持下去。然而事实上，

除了宇宙本身之外,每个真实系统,不论是量子的或是经典的,都与外部环境密切联系,是开放的系统,而不是孤立的封闭系统。外部环境可以是分子、原子,也可以是光子。它们就像一个个“观测者”,不断和处于量子叠加态的系统发生耦合作用。这种不可避免的耦合作用,会导致系统的相位关联不可逆地消失,从而破坏系统的量子叠加性,促使系统的波函数坍缩到某个确定的经典态。

简单来说,一个与环境隔绝的量子系统处于纯态的叠加态,但它一旦接触外部环境,它与环境的相互作用就将破坏它的叠加态,这就是环境使系统发生退相干。

我们以电子双缝干涉实验为例,一个电子的状态是穿过缝 A 和穿过缝 B 两种状态的叠加态,如果没有观测仪器,屏幕上会出现干涉条纹,但一旦进行观测,在光子的作用下电子的叠加态会退相干,于是我们就会测量到一个落点,这就解释了波函数为什么会坍缩。因此,退相干理论以一种新的视角审视量子测量难题,这一点是使得该理论受到部分物理学家追捧的原因。

但是退相干理论并没有从根本解决测量问题,它可以说明为什么特定的对象在受到观测时会表现为经典的测量结果,但不能说明它是如何从众多的可能结果转变为一个特定的结果的。换言之,退相干理论并不能取代观测使得用“波函

数坍缩”的假设来解决测量问题,它本身无法说明为何一次特定的测量会得到某个特定的结果而不是另一个。可以说,退相干解释是波函数坍缩解释的现代扩展版本。

10.4 GRW 解释

1986 年 7 月,三位意大利物理学家吉拉迪、瑞米尼和韦伯在《物理评论》杂志上发表了一篇论文,题为《微观和宏观系统的统一动力学》,从而开创了以他们的姓名首字母为名的 GRW 理论。

GRW 理论提出了一种新的动态坍缩模型,其主要假定是,任何系统,不管是微观还是宏观的,都不可能在严格意义上孤立,也就是和外界毫不相干。它们总是和环境发生着种种交流,为一些随机的过程所影响。这些随机的物理过程所产生的微小扰动,会导致系统从一个不确定的叠加状态变为在空间中比较精确的定域状态,也就是说,波函数坍缩是一种自发的从叠加态变为定域态的过程。

GRW 解释虽然是完全基于随机过程的,避免了“观测者”的出现,但它并没有解释波函数坍缩的基本难题,也就是坍缩本身的机制是什么。他们所建立的只是一种有趣的数学模型。因此,GRW 解释没有得到大多数物理学家的支持,也

未成为量子论的主流。

10.5 求助意识的解释

波函数坍缩属于正统哥本哈根解释：每当我们一观测时，系统的波函数就坍缩了，按概率跳出来一个确定性的实际结果，如果不观测，那它就按照薛定谔波动方程严格发展。这两种迥然不同的过程，后者是连续的，在数学上是可逆的，完全确定的，而前者却是一个“坍缩”，它随机，不可逆，至今也不清楚内在的机制究竟是什么。这两种过程是如何转换的？是什么触动了波函数这种激烈的变化？是观测吗？那么，什么样的行为算是一次“观测”？都没有一个精确的定义。因此，对于波函数坍缩的解释历来是科学家们争论的焦点。

1932年，计算机之父冯·诺依曼出版了经典的量子力学教材《量子力学的数学基础》，书中明确地给出了波函数坍缩这个概念，并且认为导致波函数坍缩的可能原因是观察者的意识。诺依曼认为，量子理论不仅适用于微观粒子，也适用于测量仪器。于是，当我们用仪器去“观测”的时候，这也会把仪器本身卷入这个模糊叠加态中间去。假如我们再用仪器B去测量仪器A，好，现在仪器A的波函数又坍缩了，它的状态变成确定。可是仪器B又陷入模糊不定中……总而言之，当我

们用仪器去测量仪器,整个链条的最后一台仪器总是处在不确定状态中,这叫做“无限复归”。从另一个角度看,假如我们把测量的仪器也加入整个系统中,这个大系统的波函数从未彻底坍缩过!

可是,当我们看到仪器报告的结果后,这个过程就结束了。我们自己不会处于什么模糊叠加态中去。奇怪,为什么用仪器来测量就得叠加,而人来观察就得到确定结果呢?诺依曼认为人类意识的参与才是波函数坍缩的原因。

然而,究竟什么才是“意识”?它独立于物质吗?它服从物理定律吗?这带来的问题比我们的波函数本身还要多得多,这是一个得不偿失的解释。

后来,维格纳于20世纪60年代再次发展意识论,并提出一个称为“维格纳的朋友”的悖论来论证意识论导致波函数坍缩的合理性。他认为有意识的生物在量子力学中的作用一定与无生命的测量装置不同。维格纳进一步建议,考虑到意识对波函数的特殊作用,量子力学中的线性薛定谔波动方程必须用非线性方程来代替。然而,大多数物理学家并不相信维格纳找到了波函数坍缩的客观原因。

到此为止,作者已经带领大家去探索了哥本哈根、隐变量、多世界、退相干、GRW、意识论等大部分先人走过的道路。但是,量子论的道路仍未走到尽头,人们还在为如何“解释”而

争吵不休，这在物理史上可是前所未有的事情！想想牛顿力学，想想相对论，从来没有人为了如何“解释”它们而操心过，这更加凸显了量子论的神奇。要知道，量子论所描述的物质观、自然观、世界观始终与我们的常识相去甚远。这正是量子论吸引人的魅力所在。

11.1 经典信息的含义

大家知道,火车传输的是旅客或货物,高压电网传输的是电能,那么通信系统传输的是什么?是物质实体吗?不是!摄像机前面的演员并没有被运送到电视机前面和观众见面,维纳说:“从线路的一端到另一端不需要任何物质(实体)的运动。”通信系统传输的是能量吗?也不是!我们说,传输的是信息(information),它是我们认识世界的第三要素。维纳说:“信息就是信息,不是物质也不是能量。”

信息与物质、能量到底有何区别与联系呢?一般来说,信息的传输不遵守守恒原理。一个老师一辈子将他的知识(信息的一种形式)传播出去,广为学生所知,但他并不因此损失了信息。当然信息与物质和能量是有关系的,信息需要物质作为它的载体;它的传输需要消耗一定能量。

信息概念具有丰富的内涵,现代科学认为信息是事先发出的消息、情报、指令、数据、符号等所包含的内容。人们通过获取、识别自然界和人类社会的不同信息来区分不同事物,得以认识和改造世界。1948年,申农在《通信的数学理论》中提出了信息被认为是“不确定性的减少”。例如,如果有人来广州找他的弟弟,而不知道他弟弟的地址,于是就有许多可能的情况,可能在工厂当工人,也可能在大学读书,可能在中山大学,也可能在华南理工大学……他处于一种疑惑不定的状态。当有人告诉他,他弟弟在中山大学时,他获得了信息,减少了某种不确定性。当然他仍有不确定性,当人们再告诉他,他弟弟在中山大学管理学院时,他又获得了信息,进一步减小了不确定性。既然信息被认为是“不确定性的减少”,那么信息如何度量呢?在申农创立信息论之前,人们认为信息是无法定量描述的,比如一条消息,一篇文章,一幅绘画或者一段音乐,谁也不敢告诉我们它们包含的信息量是多少。在信息论中申农定义:一条消息的信息量是该消息所表述事件发生概率的对数的负值。记为

$$I(x_i) = -\log p(x_i)$$

式中 x_i 表示事件, $p(x_i)$ 是事件 x_i 发生的概率。通常取对数底为 2,给出信息量的单位为比特(bit)。

由上述信息量的定义,可以作出以下几点推论:

(1) 如果一条消息所描述的事件必然发生,即发生概率 $p(x_i)=1$,由上式可知 $I=0$ 。例如,有人告诉你“明天太阳将从东方升起”,这条消息的信息量当然是零。

(2) 对完全不可能发生的事件,即 $p(x_i)=0$,这时上式变得无意义,在信息论中规定这种情况下的信息量 $I=0$ 。作这种规定显然也是合理的,比如消息说“明天太阳将从西方升起”,这条消息的信息量当然应当是零。

(3) 由于任何事件发生的概率 $0 \leq p(x_i) \leq 1$,所以 $I \geq 0$,即信息量是非负的。

例如,一个二值系统(0,1),若取二值之一的概率是 $\frac{1}{2}$,给出这个系统取值是 0 或 1 的信息量为

$$I = -\log\left(\frac{1}{2}\right) = 1(\text{bit})$$

1 bit(比值)就是含有两个独立的,等概率可能状态的事件所具有的不确定性被清除时所需要的信息量。

可见,要使一个系统从不确定性(或无序)走向有序就要有信息,而信息的丧失则意味着不确定程度的增加。因此,信息对于揭示事物的组织结构程度、研究物质和能量的时空分布不均匀程度,以及实现人、财、物等要素的良性循环,达到管理目标和优化管理效果等都具有特别重要的意义。

申农用信息论将世界的不确定性与信息联系起来,告诉

我们要“用不确定性的眼光看待世界,再用信息来清除这种不确定性。”今天,人类解决智能问题,就是将问题转化为清除不确定性问题,而大数据则是解决不确定性问题的良药。这是因为机器获得智能的方式和人类不同,它不是靠逻辑推理,而是靠大数据和智能算法。

11.2 量子信息的含义

在经典信息中,信息的基本单元是比特(bit)。经典比特只有一个是0或1的状态。一个比特是给出经典二值系统一个取值的信息。从物理角度来讲,比特是一个两态系统,它可以制备为两个可识别状态中的一个,例如,是或非,真或假,0或1等。在数字计算机中电容器平板之间的电压可表示经典信息比特,有电荷代表1,无电荷代表0。经典信息可以用经典物理学进行描述,不需要量子力学描述。

量子力学用量子态来描述粒子或系统所处的状态。事实上,量子世界的千奇百怪的特性正是起源于这个量子态。在量子信息中,采用这个奇妙的量子态作为基本信息单元,称为量子比特(qubit)。一个量子比特是一个双态系统,且是两个线性独立的态。常用狄拉克符号记为: $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 。比如,我们采用光子的偏振来表示,规定光子水平偏振为 $|0\rangle$,垂直偏

振为 $|1\rangle$ 。

量子比特是两种态的线性叠加,记为 $|\varphi\rangle = a|1\rangle + b|0\rangle$,其中, a, b 分别代表粒子处于两种态的概率振幅。如此一来,这样的 一个 qubit 不仅可以表示单独的“0”和“1”($a=0$ 时,只有“0”态, $b=0$ 时,只有“1”态),而且可以同时表示“0”,又表示“1”(a, b 都不为 0 时)。

由此可见,量子比特可以处于 $|0\rangle, |1\rangle$ 之间的连续状态之中,直到它被观测。当量子比特被观测,只能得到非“0”即“1”的测量结果,每个结果有一定概率。

量子比特的物理载体是任何两态的量子系统,如光子、电子、原子核等。一旦用量子态来表示信息便实现了信息的“量子化”,于是有关量子信息的所有问题都必须采用量子力学来处理。信息的演化遵从薛定谔波动方程,信息传输就是量子态在量子通道中的传送,信息处理是量子态幺正变换,信息提取便是对量子系统实行测量。

量子信息可以看作是微观物质的属性。处于量子相干长度之内的微观物质都可以成为量子信源,产生量子信息。量子信息的产生要以微观物质的运动作为前提。任何微观物质的量子运动都会有量子信息产生。经典信息不能产生量子信息。人的意识也不能产生量子信息。量子信息只能存在于量子系统之中,而不能存在于一般性的日常社会生活中。人类

社会的生活自身不能产生量子信息,因为人是宏观的,宏观的人不能产生量子关联。这是因为量子信息产生的物理基础是处于量子相干长度之内的微观物质或微观事物。从哲学来讲,量子信息将信息从经典领域拓展到量子领域,丰富了信息的含义。

国际著名的量子信息权威 Bennett 于 2000 年在《自然》杂志上发表一篇评述性文章,他精辟地指出:从经典信息到量子信息的推广,就像从实数到复数的推广一样。

11.3 量子信息与经典信息的联系与区别

我们对量子信息与经典信息进行比较,两者既有联系又有区别。它们之间的联系主要表现在:

(1) 量子信息与经典信息都需要有物质作为载体才能进行传递。就如经典物理学与量子物理学的联系一样,经典信息可以归结为量子信息的特殊情形,如同实数可以归结为复数的特殊情形。

(2) 量子信息与经典信息都是描述信息的不同层面,是相互联系的。量子信息与经典信息是相互补充、相互统一的。量子信息的传递与接收都不能离开经典信息,量子信息必须要有经典信息作为辅助手段。尽管量子信息通过量子纠缠表

现出超光速、非定域的特点,但是,量子信息的传递和提取则不可能超过光速,因为量子信息必须有经典通信信道作为补充,而经典信息的传递速度不可能超过光速。可见,量子信息与经典信息统一在信息的传递过程中。

(3) 从信息的最基本的载体来看,两者都需要一个两态物理系统来作为载体。经典信息由两态的经典物理系统来表达,而量子信息则由两态的量子系统来实现。

(4) 从信息的传递通道来看,经典信息与量子信息都必须有经典通道才能完成经典或量子信息的传递。

尽管量子信息与经典信息是相互联系的,但它们之间有着本质区别。具体表现在以下方面:

(1) 两者依据的物理学基础不一样。经典信息处理依据经典物理学,而量子信息处理依据量子力学。经典信息属于经典物理范围,而量子信息属于量子力学的微观范围。

(2) 经典信息不具有相干性和纠缠性,而量子信息具有相干性和纠缠性。量子相干性在各种量子信息过程中都起着至关重要的作用,但是,因为环境的影响,量子相干性将不可避免地随时间指数衰减,这就是量子消相干效应。而经典信息则没有。消相干性效应表明,量子信息受环境的影响很大。

(3) 经典信息可以完全克隆,而量子信息不可克隆。1982年,Wootters和Zurek在《自然》杂志上提出了量子不可

克隆定理的最初表述：是否存在一种物理过程，实现对于一个未知量子态的精确复制，使得每个复制态与初始量子态完全相同？该文证明，量子力学的线性特性禁止这样的复制。

经典信息完全可以克隆，而量子信息不可克隆。所谓量子克隆是指原来的量子态不被改变，而在另一个系统中产生一个完全相同的量子态。克隆不同于量子态的传输。量子态传输是指量子态从原来的系统中消灭，而在另一个系统中出现。量子不可克隆是指两个不同的非正交量子态，不存在一个物理过程将这两个量子态完全复制。如果可以准确地复制量子态，即存在着许多完全相同的量子态，我们就可以同时准确测量共轭量（如坐标与动量等），这就与量子力学的测不准原理相矛盾。

（4）经典信息可以完全删除，而量子信息不可以完全删除。已有学者证明，任何未知的量子态的完全删除是不可能的。显然，这是量子信息不同于经典信息的重要特征。这或许意味着，经典信息的客观性程度没有量子信息的客观性程度高。这一性质表明了量子信息不同于经典信息的重要特征：经典信息可以被创造和消灭，而量子信息可以被创造，但不能被完全消灭。

量子计算

量子力学的创立为超级强大的量子计算机问世,在理论上消除了不可跨越的障碍,但在技术上要造出有实际价值的量子计算机,还有一段路程要走,让我们拭目以待。

12.1 量子计算概述

对于经典计算机来说,它处理的是二进制码信息,1 个比特(bit)是信息的最小单位:它要么是 0,要么是 1,对应于电路的开或关。假如一台计算机读入了 10 个 bit 的信息,那么相当于说它读入了一个 10 位的 2 进制数(比如说 1010101010),这个数的每一位都是一个确定的 0 或者 1。

接下来就让我们进入神奇的量子世界。一个 bit 是信息流中的最小单位,这看起来正如一个量子!我们回忆一下前面的论述,量子理论最叫人困惑的是什么呢?是不确定性。

我们无法肯定地指出一个电子究竟在哪里,我们不知道它是通过了左缝还是右缝,我们不知道薛定谔的猫是死了还是活着。根据量子理论的基本方程,所有的可能性都是线性叠加在一起的。电子同时通过了左和右两条缝,薛定谔的猫同时活着和死了。只有当实际观测它的时候,上帝才随机地掷一下骰子,告诉我们一个确定的结果。

大家不要忘记,我们的电脑也是由微观的原子组成的,它当然也服从量子定律。假如我们的信息由一个电子来传输,我们规定,当一个电子是“左旋”的时候,它代表了 0,当它是“右旋”的时候,则代表 1。现在问题来了,当我们的电子到达时,它是处于量子叠加态的。这岂不是说,它同时代表了 0 和 1?

这就对了,在我们的量子计算机里,一个 bit 不仅只有 0 或者 1 的可能性,它更可以表示一个 0 和 1 的叠加。一个“比特”可以同时记录 0 和 1,我们把它称作一个“量子比特”(qubit)。假如我们的量子计算机读入了一个 10 个 qubit 的信息,所得到的就不仅仅是一个 10 位的二进制数了。事实上,因为每个 bit 都处在 0 和 1 的叠加态,我们的量子计算机所处理的是 2^{10} 个 10 位数的叠加。

换句话说,同样是读入 10bit 的信息,经典计算机只能处理 1 个 10 位的二进制数,而如果是量子计算机,则可以同时

处理 2^{10} 个这样的数。显而易见,量子计算机执行的是一种并行计算。正如我们前面举的例子,当一个 10bit 的信息被处理时,量子计算机实际上操作了 2^{10} 个态。

对于一个 n 个 bit 的经典存储器,则它只能存储 2^n 个可能的数据当中的任意一个。若它是 n 个 bit 的量子存储器,则它可以同时存储 2^n 个数据。由此可见,量子计算机对 n 个 bit 量子存储器实行一次操作,即同时对所存储的 2^n 个数据进行数学运算,等效于传统计算机重复实施 2^n 次操作,或者等效于采用 2^n 个不同的处理器进行并行操作。随着 n 的增加,量子存储器存储数据的能力将指数上升。比如我们要分解一个 250 位的数字,如果用传统计算机的话,就算我们利用最有效的算法,把全世界所有的计算机都联网到一起联合工作,也要花上几百万年的时间。但如果用量子计算机的话,只需几分钟。

量子计算机的并行计算,就像孙悟空的分身术能变出很多小孙悟空一样,一下子化身成千千万万台计算器,同时进行运算。从经典计算机飞跃到量子计算机,整个人类的计算能力、处理大数据能力,将出现上千上万乃至上亿次的提升。

在量子计算方面,我国在国际学术界已牢牢占据了一席之地。2017 年,我国研制了全球首台光量子计算机的原型。潘建伟院士介绍,中国量子科学家计划通过三到五年的努力,

实现 50 比特的相干操纵,使其计算能力在某些特定问题求解上,媲美目前最好的经典超级计算机。

12.2 量子计算的关键性问题

实现量子计算,必须解决三个关键性问题:一是量子算法,以提高运算速度;二是量子编码,它是进行可靠运算的保证;三是量子逻辑网络,它是作为量子计算的物理器件。

12.2.1 量子算法

所谓量子算法就是求解一类问题的方法。比如,计算从 1 到 100 的和,有多种方法:方法一, $1+2+3+\cdots+100$ 依次计算。方法二,先计算 1 到 20 之和,其次计算 21 到 40 的和……把这 5 个 20 个数的和相加就得到总和。方法三,先加 1 与 100,其次加 2 与 99,如此进行下去,也可以得到总和。显然在这些方法中,有某种方法是最节约时间和存储空间的。对于大量的数据,寻找出最优的方法就可以大量节约计算所需要的时间与空间。

目前创造出来的一些量子算法已显示出超越经典计算机的强大能力。例如,1997 年美国贝尔实验室的科学家格罗夫(Grover)发现了一种具有广泛用途的量子搜寻算法。它适用

于解决如下问题：从 n 个未分类的客体中寻找出某个特定的客体。应用该算法，在一个存储全球电话号码的数据库中，检索某个人的电话号码，用“深蓝”超级计算机将花几十个月的时间，而使用量子搜索算法则只需几十分钟。

12.2.2 量子编码

在量子计算机概念刚提出时，有人提出“利用计算机进行复杂运算是不可可能的”，其原因是：计算机运算过程中必然要遇到噪声，只要噪声使得计算机中任一运算发生一次错误，就会使最终的运算结果为假。那么，如何克服这一困难？关键在于量子编码。严格来讲，就是信道编码，通过引入冗余信息，使得一部分比特发生错误的情况下，仍有可能按照一定规则纠正这些错误，以实现无失真地传送和处理信息。例如，我们看一下最简单的经典重复码。将信号 0 编码为 000，信号 1 编码为 111，如果最多只有一个比特发生错误，假设 000 变成了 010，我们按照少数服从多数的原则，找出错误的比特（第二比特），就可以纠正错误。

量子编码和经典编码的基本思想相似，以适当方式引进信息冗余，以提高量子信息的抗干扰能力。但是，由于量子编码在纠错时需要进行量子测量从而破坏了量子相干性，量子纠错就非常困难。

1995 年肖尔(Peter Shor),1996 年斯特勒(Steane)各自独立地提出了两个量子纠错编码方案。他们使用了非常巧妙的办法,克服了量子编码的困难。

12.23 量子逻辑网络

实现量子计算的关键在于制备适合量子网络的物理器件体系。目前在核磁共振、超导系统等已演示了简单的量子网络。实现量子计算已不存在理论上不可跨越的障阻,但是,技术上的实现却遇到了一定的困难,有待克服。

12.3 量子计算的基本特点

量子计算主要具有以下的特点:

12.3.1 量子存储器具有巨大的存储能力

量子计算机的最基本存储单元是量子比特。一个量子比特是一个双态系统,且是两个线性独立的态。两个独立的基本量子态常用狄拉克符号记为: $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 。量子比特是两态量子系统的任意叠加态。比如, $|\phi\rangle = C_0|0\rangle + C_1|1\rangle$,且 $|C_0|^2 + |C_1|^2 = 1$,其中系数 C_0 和 C_1 为复数。

量子寄存器就是量子比特的集合。对于 n 个比特的系

统,其中一个状态可表示为 $|a\rangle = |a_{n-1}\rangle |a_{n-2}\rangle \cdots |a_1\rangle |a_0\rangle$

$$a = 2^{n-1}a_{n-1} + 2^{n-2}a_{n-2} + \cdots + 2^1a_1 + 2^0a_0$$

$$\text{其中 } a_i = \begin{cases} 1 & i = (n-1), (n-2), \dots, 2, 1, 0 \\ 0 & \end{cases}$$

比如,5 的二进制为 101,其量子寄存器表示的量子状态为

$|\psi\rangle = |1\rangle |0\rangle |1\rangle = |2^2 \times 1 + 2^1 \times 0 + 2^0 \times 1\rangle = |4 + 1\rangle = |5\rangle$,对于 n 位量子寄存器,可以存储的基态的脚标为: $N = 0, 1, 2, \dots, (2^n - 1)$,即有 2^n 个基态。最一般的态就是希尔伯特空间中的一个矢量,为各种可能的基态乘以相应的复系数的叠加,表述为

$$|\psi\rangle = \sum_{N=0}^{2^n-1} C_N |N\rangle, \text{它描述了可存储的各种可能的、不同的}$$

态的同时存在,这是量子寄存器不同于经典寄存器的特征。

按照经典信息论,对于一个二值系统(0,1),若取二值之一的概率为 1/2,则给出这个系统的取值是 0 或 1 的信息量就是 1 比特。对于 n 个二值系统, n 位二进制数共有 2^n 个,每个都等概率地出现,于是指定其中一个的信息量就是 n 比特。换言之,一个经典比特可以制备在两个逻辑态 0 或 1 中的一个态上,而不能同时存储 0 和 1。但是,一个量子比特可以制备在两个逻辑 0 和 1 的相干叠加态,即是说,一个二进制量子

